

# 嫦娥二号卫星技术成就与中国深空探测展望

叶培建<sup>①</sup>, 黄江川<sup>①\*</sup>, 张廷新<sup>①</sup>, 孟林智<sup>②</sup>

① 中国空间技术研究院, 北京 100094;

② 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

\* E-mail: hjiangchuan@126.com

收稿日期: 2013-01-02; 接受日期: 2013-02-28

国家中长期科技发展规划重大专项资助项目

**摘要** 嫦娥二号卫星是中国第二颗月球探测卫星, 设计主要目标为先期验证后续月球着陆任务的部分关键技术, 并深化月球科学探测. 圆满完成既定任务后, 嫦娥二号飞离月球, 进入行星际空间, 在国际上首次实现从月球轨道转移日-地拉格朗日 L2 点. 此后, 在距地 700 万千米, 实现国际上首次与 4179 图塔蒂斯小行星近距离交会并获取最高分辨率优于 3 m 的光学图像. 本文主要描述了嫦娥二号卫星的主要任务要求、任务特点、研制历程、在轨飞行评价、扩展任务、后续飞行状态和取得的主要技术成就. 在分析、对比国内外深空探测现状的基础上, 提出未来我国深空探测后续发展的几点建议.

**关键词**  
嫦娥二号  
技术成就  
深空探测展望

## 1 引言

嫦娥二号卫星于 2010 年 10 月 1 日成功发射, 2011 年 4 月 1 日圆满实现既定六大工程目标, 并获取一批重要科学数据. 在扩展任务阶段, 嫦娥二号卫星于 2011 年 6 月 9 日飞离月球, 于 2011 年 8 月 25 日捕获日-地拉格朗日 L2 点轨道. 至 2012 年 4 月, 卫星圆满完成在 L2 点一个完整拟周期的飞行探测, 4 月 15 日, 成功进行了 L2 点离轨控制, 进入行星际空间, 踏上不断创造新“高度”的征程. 卫星于 2012 年 12 月 13 日, 在距地 700 万千米, 实现国际上首次与 4179 图塔蒂斯小行星近距离交会并获取最高分辨率优于 3 m 的光学图像. 于 2013 年 1 月 5 日 23 时 46 分, 突破距地 1000 万千米的距离. 嫦娥二号卫星成为我国第 1 个飞入行星际的探测器, 首次创造性地跨越实现了对拉格朗日点和小行星的探测, 成为具有国际水准和特色的多目标多任务探测器. 中国也成为国际

上第 3 个飞入拉格朗日点、第 4 个开展小行星探测的国家.

我国于 2007 年 10 月成功发射嫦娥一号卫星之后, 于 2008 年探月工程二期立项. 其主要目标是实现在月面软着陆, 开展月面就位探测与自动巡视勘察. 其特点是关键技术多、技术跨度大、实施难度高. 从国际上看, 前苏联实现月面软着陆之前, 先后进行了 8 次掠月和绕月飞行, 开展了多次着陆点探测, 直到第 9 次才实现了半软着陆; 到第 14 次, 才实现了月球车释放. 美国也是在先后进行了多次飞越月球、月球撞击试验和着陆点勘察之后, 到第 18 次才实现了月面软着陆.

为降低月面软着陆技术风险, 积累工程经验, 需要对探月工程二期的部分关键技术进行先期飞行验证, 并对预选着陆区进行高分辨率成像. 为此, 嫦娥二号卫星的任务定位为以下 4 方面.

1) 技术方面: 从探测器及其轨道与控制、测控

及相关产品等方面, 先期验证未来月面软着陆动力下降段前的主要关键技术。

2) 实施方面: 获取预选着陆区精细地形地貌数据, 降低着陆风险。

3) 科学方面: 进一步获取地月空间和月球基础科学数据, 深化月球科学领域研究, 提高探测精度, 扩大探测范围。

4) 扩展方面: 推进深空探测发展, 开展行星际探测相关技术验证。

嫦娥二号任务工程由卫星、运载火箭、测控、发射场和地面应用五大系统组成, 其工程目标与科学目标如下。

工程目标<sup>[1]</sup>:

1) 突破运载火箭直接将卫星发射至地月转移轨道的发射技术;

2) 验证 100 km 月球轨道捕获技术;

3) 验证 100 km×15 km 轨道机动与快速测定轨技术;

4) 对嫦娥三号任务预选着陆区——虹湾地区进行高分辨率成像试验;

5) 试验 X 频段深空测控技术, 验证深空测控体制;

6) 试验 12 Mbps 高速数据传输和低密度奇偶校验码(LDPC)遥测信道编码、轻小型 CMOS 监视和降落相机等高新技术。

科学探测任务<sup>[1]</sup>:

1) 获取月球表面三维影像, 分辨率优于 10 m;

2) 探测月球物质成分;

3) 探测月壤特性;

4) 探测地月与近月空间环境。

## 2 嫦娥二号卫星简介

嫦娥二号卫星系统有总体、综合测试分系统和结构、热控、制导/导航与控制(GNC)、推进、供配电、数据管理、测控数传、定向天线、技术试验(工程载荷)、有效载荷等 13 个分系统, 如图 1 所示。卫星发射质量 2480 kg, 干重 1169 kg, 携带 166 kg 载荷(含 136 kg 有效载荷和 30 kg 工程载荷)。嫦娥二号卫星主要技术指标如表 1 所示。

## 3 任务特点和研制原则

虽然有嫦娥一号卫星作为研制“样板”, 但针对新的任务定位和要求, 嫦娥二号卫星在研制过程中仍然面临着“周期较短、状态交叉、关键很多”等诸多方面的挑战<sup>[2]</sup>。

### 3.1 研制周期较短

嫦娥二号卫星在利用了嫦娥一号卫星大部分设

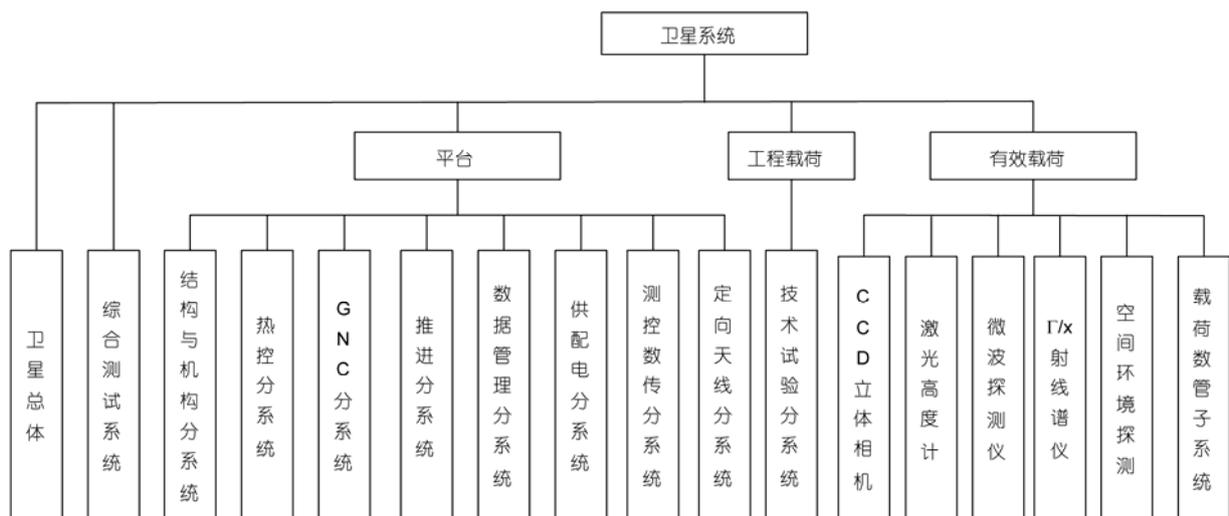


图 1 嫦娥二号卫星系统组成

表1 嫦娥二号卫星主要技术指标

项目名称		技术要求
卫星平台	卫星重量	≤2480 kg
	卫星干重	≤1175 kg
	工作轨道	工作轨道: 100 km×100 km 试验轨道: 100 km×15 km
	卫星寿命	6个月
	结构本体尺寸	2000 mm×1720 mm×2200 mm
	对月指向姿控精度	≤±1°(3σ)
	对月指向姿控稳定度	≤0.005°/s
	推进方式	双组元统一推进系统
	供电输出功率	1466 W(末期, 45°入射角)
	测控体制	USB+VLBI
	遥测码速率	512 bps/1024 bps(编码后)
	遥控码速率	125 bps
	编码方式	卷积编码/LDPC 编码
	数传调制方式	BPSK
	数传码速率	6 Mbps(3 Mbps, 1.5 Mbps, 750 kbps, 试验 12 Mbps)
工程载荷	X 应答机载波捕获门限	-125 dBm(5kHz/s 扫描, ±115 kHz 范围内) -140 dBm(20Hz/s 扫描, ±50 kHz 范围内)
	X 频段测控遥控码速率	1000 bps/125 bps/7.8125 bps
	X 应答机遥测码速率	512 bps(编码后)
	X 应答机遥测信道编码	卷积码
	数传码速率	6 Mbps(3 Mbps, 1.5 Mbps, 750 kbps, 23.4375 kbps)
	监视相机指标	彩色; 分辨率 1024×1024; 帧频 5 fps; 成像距离: 1m~∞
有效载荷	有效载荷重量	≤140 kg
	有效载荷功耗	≤200 W
	CCD 立体相机成像方式	单物镜成像, 线阵推扫
	CCD 相机月表分辨率	优于 10 m(100 km×100 km) 优于 1.5 m(100 km×15 km)
	激光高度计测距分辨率	1 m
	γ 射线谱仪仪器能量分辨率	4% @ 662 keV
	X 射线谱仪低能探测器能量分辨率	≤300 eV @ 5.95 keV
	X 射线谱仪高能探测器能量分辨率	≤10% @ 59.5 keV
	微波探测仪探测频率	分别为 3.0 GHz, 7.8 GHz, 19.35 GHz, 37 GHz
	微波探测仪带宽	分别大于 100 MHz, 200 MHz, 500 MHz, 500 MHz

备产品的基础上, 也增加了很多新技术. 按既定任务新要求, 系统总体完成了顶层设计; 按运行轨道及其相应环境, 热控分系统重新设计; 新增技术试验分系统包含了所有新技术验证设备(即工程载荷设备); 为深化科学探测, 有效载荷设备或新研或大改; 上述两

个分系统均需经历初样研制. 在两年左右的时间内, 要求完成系统设计、技术攻关、产品研制、系统集成与测试和卫星发射等全部工作, 迫使跨阶段交叉、并行开展研制, 还要保证状态控制、阶段匹配无差错, 无疑面临巨大挑战.

### 3.2 产品状态交叉

嫦娥二号卫星的星载硬件和软件状态复杂, 共 243 台(套)硬件产品, 70 套软件产品。其中, 经论证可继承的约占 85%, 需适应性修改的约占 10%, 新攻关研制产品约占 5%。新研产品要经过方案、初样、正样等多阶段, 无疑是短线项目; 在短周期限制下, 不同阶段的产品必须并行研制, 混合集成在所难免。为控制风险, 制定了符合自身特点的特有技术流程, 合理并行, 强化新产品攻关, 严格技术状态控制。

### 3.3 关键环节很多

关键产品多。为实现工程目标, 完成技术验证和科学探测任务, 突破最新高精尖技术, 研制全数字 X 频段应答机、集成数据处理单元、CCD 立体相机、轻小型 CMOS 降落相机等国内首创、国际先进的产品。为保证系统设计可靠, 将工程载荷集成设立技术试验分系统, 主要用于实现星地 X 频段测控体制验证, 并为后续任务验证新一代相关产品技术。

关键技术多。在系统设计和产品研制过程中, 突破了轨道设计与机动飞行、延时积分成像速高比补偿、X 频段-140 dbm 高灵敏度、7.8125 bps 低码速率解调、天基光学成像视景仿真、飞控支持与仿真、推进系统延寿及集成化轻小型星载计算机、COMS 相机等 10 余项关键技术。

飞行过程中关键事件多。以嫦娥一号的 200 km 制动与环月为技术基础, 嫦娥二号进而实现直接 100 km 近月制动与环月飞行, 增加近月 15 km 轨道机动(在月球背面轨道机动而不能测控)与虹湾区域成像等关键事件, 试验多、任务剖面复杂, 对卫星自主能力要求高。

针对上述研制背景及任务特点, 系统设计和研制原则如下。

1) 在满足探月二期工程技术验证、载荷性能改善前提下, 所采取的技术实现途径尽可能不影响嫦娥一号卫星已验证的技术状态。

2) 在采用必要的新技术、新设计实现任务目标前提下, 尽可能采用先进的成熟技术或经过预研的新技术, 提高产品可靠性。

3) 按嫦娥一号卫星经验, 在充分继承基础上, 勇于创新。

4) 强化从系统顶层设计, 体现航天工程延续性。一方面圆满完成先导验证任务, 另一方面为后续深

空探测打基础, 通过相关新技术突破, 推动技术发展。

5) 在确保高可靠完成既定任务并还可能富余较多推进剂前提下, 尽可能在通信距离更远、控制与管理自主性增强、推进系统延寿及产品寿命指标等方面预留手段和裕度, 以保留可能的拓展新任务、新目标的预期。

总之, 根本目标在于抓住难得的有利之机, 承上启下、循序渐进、自顶向下, 全面、加速推进探月及深空探测领域技术发展。

## 4 研制历程

嫦娥二号卫星从任务设计开始, 历经方案、初样、正样、发射实施等阶段, 仅用了两年多时间, 完成了研制与发射实施任务。

2008 年, 主要完成了整星方案设计, 开展了顶层策划、技术状态清理及复核、总体规范制订等研制工作。开展了任务轨道设计、大系统间接口协调、分系统技术规范制订、X 波段应答机等新产品技术攻关和针对任务要求和环境变化的专项试验工作。在顶层策划方面, 完成了各阶段、各层级技术流程、专项试验、质量保证与风险控制等项目工作。卫星系统直接进入正样研制阶段; 新研单机及技术试验分系统经历方案、初样、正样完整阶段; 由于大部分单机为提高性能指标方面的修改类或新研类产品, 故有效载荷分系统从初样起步。在关键技术攻关同时, 设计、开展推进气路及 490 N 发动机延寿、近月太阳翼高温适应性、时间延迟积分(TDI-CCD)相机速高比补偿等设计与验证方面的 15 项专项试验。

2009 年, 全面推进产品研制、系统集成和试验验证工作。完成了单机、技术试验和有效载荷两个分系统的初样研制, 完成了速高比补偿对测定轨精度要求、15 km 轨道飞行大系统保证等专题协调, 完成全部专项试验。完成了正样产品研制、总装、AIT 阶段电性能测试和软件/FPGA 落焊工作, 并行开展了轨道设计、空间单粒子效应防护等质量复查和复核复算, 补充了“轨道设计、飞行程序、虹湾成像、监视相机/紫外成像”等技术专题研究与协调。于 2009 年 8 月通过正样设计评审。

2010 年, 研制队伍完成了 EMC、力学、热真空等大型试验, 在卫星系统自身得到了全面、充分验证的基础上, 完成了与运载对接、测控对接、大系统无

线联试等大系统对接试验,验证了系统间接口的正确、匹配性,于2010年6月完成了质量复查和出厂评审。

2010年7月10日,嫦娥二号卫星进场.按照发射场测试流程,完成了卫星发射前的全部技术准备.2010年10月1日18时59分57秒,长征三号丙运载火箭在西昌卫星发射中心实现零窗口发射,卫星太阳翼、定向天线顺利展开,建立巡航姿态,发射取得圆满成功.相对35 min的最大窗口要求,秒级零窗口发射,节省卫星推进剂100 kg以上.此外,采用长征三号丙直接地月转移轨道发射,卫星加注满箱状态下,推进剂余量也在100 kg以上。

## 5 在轨飞行结果及重要事件

嫦娥二号卫星发射至今,全任务飞行过程重要事件示意如图2所示。

### 5.1 地月转移过程

2010年10月2日12时25分,顺利实施了第一次中途修正控制,采用490 N大推力,开机时长70 s,速度增量16 m/s.控制结果准确,满足卫星进入月球使命轨道入口点要求,取消了预定的后两次中途修正.验证了直接地月转移轨道设计与飞行技术,转移时间由12 d缩短为5 d.在嫦娥一号的基础上,设计

改进得到验证:控制精度提高,控制自主能力增强,共节省推进剂207 kg.首次成功验证了紫外导航、CMOS 视频小相机成像等先进技术.首次获取了完整的地月空间环境探测数据。

### 5.2 月球捕获过程

2010年10月6~9日,卫星共实施了3次近月制动和1次轨道平面机动,如同嫦娥一号一样,各次控制均获成功,控后卫星准确进入半长轴约1840 km、高度约100 km、周期118 min的极月圆轨道.首次验证100 km月球轨道捕获技术;基于工程可靠实施而专门设计轨道平面机动,为一个月内实施近月15 km轨道机动奠定了基础。

### 5.3 环月飞行阶段

嫦娥二号卫星在环月飞行阶段初期实施月球背面降轨控制并获取虹湾区高分辨率图像,完成了既定的各项技术试验验证.于2010年11月2日转入长期运行管理阶段.在环月150 d期间,共实施2次飞行姿态转换、3次轨道维持以及月食控制.按照科学计划开展各项科学探测任务,重点完成了全月面高精度成像。

工程技术验证方面:

1) X 频段测控体制.卫星在地月转移轨道段、100 km环月圆轨道、100 km×15 km椭圆轨道上,与

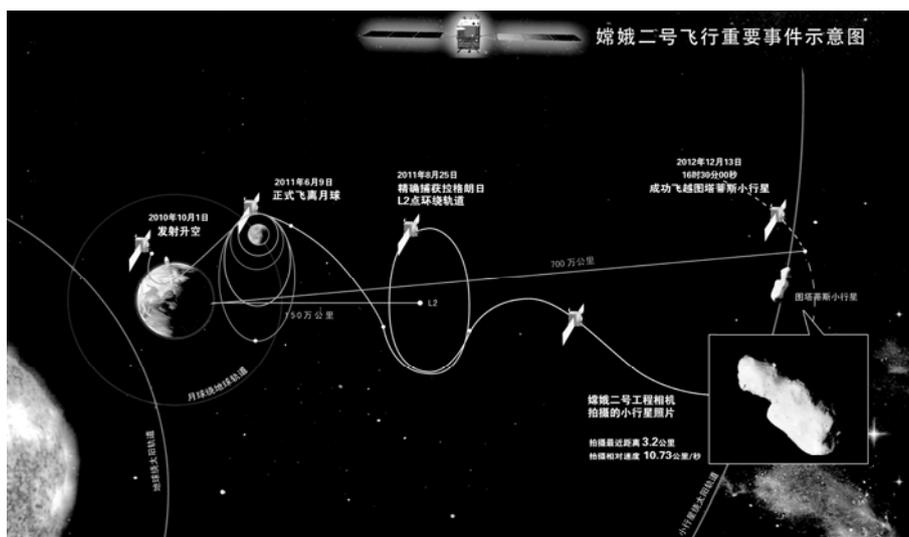


图2 嫦娥二号卫星飞行重要事件示意图

地面青岛站、喀什站和 VLBI 分系统协同进行了 7 次 X 频段测控试验. 经分析, X 频段测距、测速数据随机误差分别为米级、毫米级, 优于任务主用的 S 频段测量结果. 以星地大回路方式, 首次成功试验 X 频段测控技术, 成功验证深空测控体制.

2) 轻小型 CMOS 相机成像. 嫦娥二号卫星共配置 4 台轻小型 CMOS 相机. 其中 3 台监视相机分别对太阳翼展开、定向天线展开、历次轨道控制过程进行了监视成像. 并通过在地月转移阶段完成对地、对月成像试验, 除考核相机性能, 也首次以可视化方式检验了飞行状态设置和指令执行及先前仿真预示结果的正确性. 第 4 台相机为测量后续任务降落过程而设计, 降落相机在 2 种工作轨道成功获得良好图像. 如图 3 所示.

3) LDPC 编码及高速数传. 2010 年 10 月 14 和 15 日, 实施了 2 次高速数传链路测试, 6 和 12 M 码速率高速数传链路测试结果符合指标要求. 将嫦娥一号数传码速率提高了 4 倍, 为获取高分辨率覆盖月球图

像数据创造了条件.

4) 近月 15 km 轨道飞行及虹湾成像. 10 月 26 日, 实施近月标称 15 km 降轨, 将近月点高度由 98 km 调整到约 19 km 的椭圆工作轨道. 卫星过虹湾成像区最低轨道高度 15 km, 获取 16 轨虹湾地区高分辨率图像. 图像质量良好, 分辨率约 1 m. 如图 4 所示.

10 月 29 日, 实施近月 15 km 升轨控制, 将近月点高度由 18 km 抬高到 100 km, 卫星进入环月圆轨道开展各项科学探测. 成功验证 100 km×15 km 轨道机动与快速测定轨技术.

至此, 成功验证从发射、直接转移、100 km 制动至机动近月 15 km 各阶段飞行轨道, 即后续着陆任务中动力下降前的所有轨道. 圆满完成了工程目标规定的各项技术验证任务.

科学探测方面:

嫦娥二号卫星配置 5 类科学探测仪器: CCD 立体相机、激光高度计、 $\gamma/X$  射线谱仪、微波探测仪和

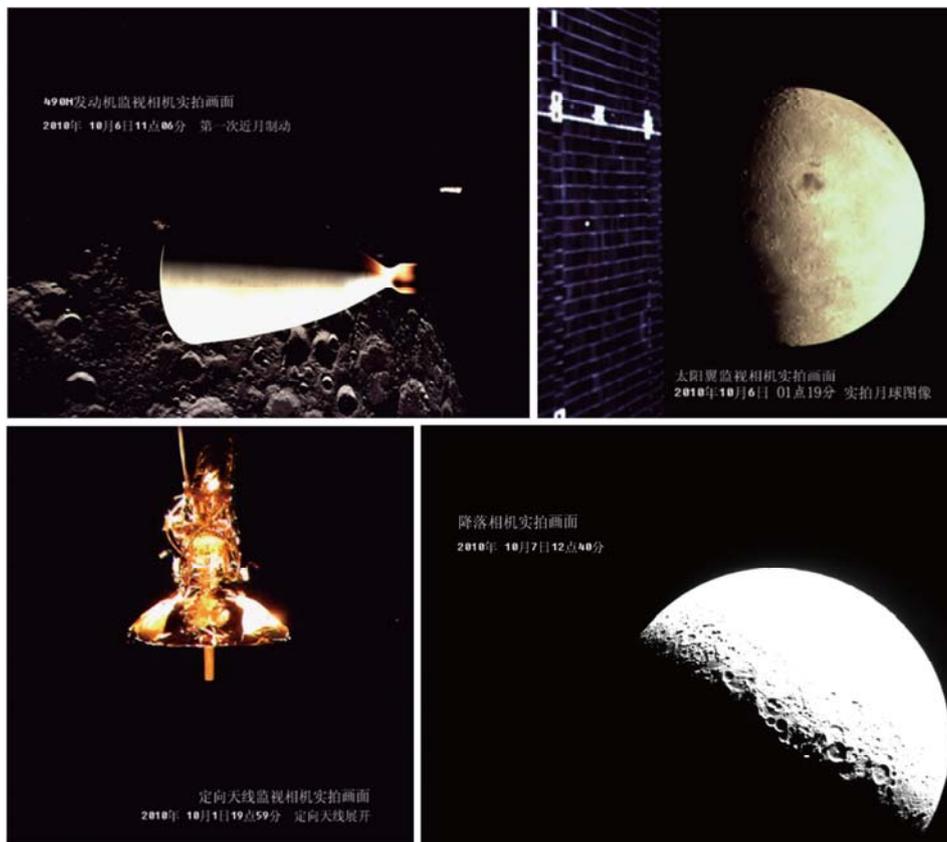


图 3 嫦娥二号卫星监视相机在轨成像



图4 嫦娥二号卫星获取的虹湾区域高分辨率图

空间环境探测仪。在环月飞行的半年时间内,开展了以 CCD 立体相机全月面拍摄为主的一系列科学探测,获取大量各类的科学探测数据。

#### 5.4 扩展任务阶段

在6个月的指标规定寿命期内,嫦娥二号圆满完成了既定的工程验证和科学探测任务。由于发射零窗口及控制精准,节省了大量推进剂,加上实际余量,卫星共剩余推进剂 520 kg。卫星能力有余量且状态良好。基于“加速提升能力、推进技术发展”的思路,以验证距地更远的行星际探测技术、积累深空探测工程经验为目标,卫星系统深化论证了扩展任务阶段的试验项目。按选择任务目标,控制风险,有序衔接、分步实施的原则,最大限度地发挥卫星潜能,设计了3阶段、多目标探测任务。

为实现效益和机会最大化,选择日-地 L2 点和近地小行星作为拓展任务的路线和方向,以跨越行星际、突破新距离为基本目的。

超越月球之外的飞行探测在中国是第1次,从地球出发历经月球、L2 点、小行星多类目标的多任务验证和探测在国际上也属创举。

实现上述目标,面临前所未有的全新技术挑战。

全新体现在新的理念、空间、领域、目标、手段、方法、过程、模式等方面,一旦突破,将跨越到新的技术平台。

在短研制周期约束下,多任务多目标的实施贯穿包括飞行过程的卫星全生命周期,包括技术理念、思路、设计、攻关到实现的全过程。实现多任务面临多约束,实现多目标带来强约束。这些约束体现在卫星的燃料、通讯、控制、时机、寿命及探测方式等方面。

除系统中的组合和集成创新外,还需突破若干全新的关键技术,包括基于三体系统流形理论的低能量转移轨道设计、基于能量、距离和时间等强约束的潜在小行星目标选取策略、逼近飞越小行星设计及基于高速交会渐远点凝视成像技术等。此外,还需比以往跨越数量级方式,突破推进剂利用、轨道测量与控制、信道预算等方面的高精度技术。首次转化创新应用了基于地基光学望远镜的小行星观测与定轨技术。

#### 5.4.1 第1阶段:月球轨道深化探测

作为探月卫星,嫦娥二号往外拓展前,在本地作完美收官。

1) 2011年4月14和15日,实施调整轨道倾角控制,用490 N 发动机,将倾角从 $92^\circ$ 调整到 $90^\circ$ ,消耗推进剂 35 kg。在2011年4月25日开始的正飞期内,重点补拍月球南北两极图像,将月球立体影像覆盖率达 99.6%提高至 100%。

2) 2011年5月20日,再次降轨,获取更多虹湾区域 1 m 级高分辨率图像,不同前次,此次用 490 N 发动机完成补充验证性控制,消耗推进剂 26 kg。

#### 5.4.2 第2阶段:日-地拉格朗日 L2 点探测

在国际上首次实现了从月球轨道飞往日-地 L2 点的转移和试验方案。具体实施过程如下:

1) 2011年6月8~9日,经过2次精确加速后脱离月球,飞往日-地拉格朗日 L2 点。

2) 2011年8月,成功到达日-地拉格朗日 L2 点,开始进行载荷科学探测

3) 2012年4月,圆满完成在 L2 点一个完整拟周期的飞行探测。

嫦娥二号成功绕飞日-地 L2 点,验证了深空轨道设计与飞行控制、150 万千米的远距离测控通信等技术,验证了 L2 轨道保持特性,并在日-地 L2 点开展了 10 个月的科学探测,填补了我国对地球远磁尾区域的离子能谱、太阳耀斑爆发和宇宙伽玛爆的科学探测的空白。

#### 5.4.3 第3阶段:4179 小行星飞越探测

在以探月为主任务设计的多约束条件下,利用 L2 点的伴随地球绕日运动特性,实现了测控地面站的接力控制,在国际上首次实现了从 L2 飞越小行星的

轨道转移. 具体实施过程如下.

2012年4月, 嫦娥二号成功进行了L2点离轨控制, 进入转移轨道飞行, 期间共实施4次中途修正, 于2012年12月13日逼近飞越4179图塔蒂斯小行星, 最近交会距离不到2 km, 在国际上首次近距离获取到目标小行星光学图像数据, 最高分辨率优于3 m.

2013年1月5日23时46分突破距地球1000万千米. 嫦娥二号卫星目前状态良好, 将不断刷新距地飞行高度, 考核卫星的寿命及自主控制与管理能力, 并协同我国深空测控站开展行星际测控通信试验.

## 6 取得的技术成就

### 6.1 技术突破

在2007年首次探月任务成功后, 经过不到3年的研制和6个月的月球轨道飞行, 嫦娥二号在圆满完成科学探测任务的同时, 也圆满完成了既定技术验证和深化科学探测, 降低了后续探月工程风险, 获取了新的科学探测数据. 历经一年半的拓展任务阶段, 嫦娥二号卫星成为我国首颗飞入行星际的探测器, 完成日-地L2点和4179小行星飞越探测, 取得一系列技术突破.

1) 设计并验证了后续着陆任务中动力下降前的所有轨道与机动飞行控制技术, 突破了直接地月转移轨道设计技术.

2) 针对月球不均匀重力场及高起伏地形环境, 突破月球拟冻结轨道设计、卫星自主惯性对准、机动轨道拼接等关键技术, 首次成功实现100 km圆轨道和100 km×15 km轨道飞行, 首次实现在月球背面无测控条件下主发动机点火变轨. 卫星轨道控制精度最高达到0.02%.

3) 在国际月球探测中首次采用时间延时积分(TDI)成像技术, 设计了由地面行频数据注入和测高数据辅助两种速高比补偿成像方法, 获得了7 m分辨率的全月球立体影像; 获得了1.3 m分辨率的局部影像, 达到国际先进水平.

4) 创新研制首台基于统一载波体制的X频段高灵敏度数字化测控应答机, 实现了深空探测领域星载测控技术的多项突破. 在轨试验验证了X频段深空测控体制和技术. 突破了差分单向测距(DOR)干涉测量、X频段数字化应答机和地面S/X双频段测控设备研制等关键技术, 测速精度达到1 mm/s、测距精度

达到1 m, 实现了7.8125 bps极低码速率遥控. 标志着我国航天测控由S频段向X频段的技术跨越, 进入国际先进行列, 为后续深空探测奠定了基础.

5) 突破微小型智能化设计技术, 首次实现了地月空间飞行过程监视成像. 首次实时获取了太阳翼展开、天线展开/转动、主发动机点火等关键环节的动态图像, 为后续重要飞行事件提供了可视化手段.

6) 首次在航天工程中于空间段应用了LDPC编译码, 编码增益和效率等主要指标优于国际(CCSDS)标准, 提高了我国在国际深空信道编译码领域的地位和话语权.

7) 首次在轨验证了推进系统高压气路长寿命技术, 为高强度(时间跨度半年以上, 次数10次以上)轨道机动及后续L2点、小行星探测试验奠定动力基础.

8) 首次突破探测敏感器、载荷一体化技术, 利用成像敏感器完成星地大回路导航试验.

9) 在地月星和日地星双三体复杂环境下, 针对日、地引力平动点摄动复杂、轨道设计无解析解、测控距离远等难点, 攻克了非线性系统流形设计、低能量转移轨道控制等技术, 实现了从月球轨道飞赴L2点的轨道设计、飞行控制和远距离测控通信. 在国际上首次实现从月球轨道飞赴日-地拉格朗日L2点探测. 开展了对地球远磁尾离子能谱、太阳耀斑爆发和宇宙伽马爆的科学探测. 使我国成为继美、欧之后第3个实现L2点开展空间探测的国家.

10) 突破距地1000万千米远的深空轨道和测控通信技术, 首次实现行星际飞行. 基于能量、距离和时间及目标物理特性等强约束, 提出潜在小行星目标选取策略, 在国际上首次设计并实现了逼近飞越探测方式及基于高速交会渐远点凝视成像技术. 国际上首次成功逼近飞越4179图塔蒂斯小行星并获取3 m分辨率光学彩色图像; 除在国际上创造千米级飞越最近距离纪录外, 也使我国成为继美、欧、日之后第4个实施小行星探测的国家.

11) 创新利用拉格朗日点伴地绕日特性, 在卫星推进剂、星地通讯距离、地面大天线进度等约束条件下, 国际上首次实现从拉格朗日点转移飞越小天体.

12) 通过创新设计、全面验证、精心实施, 充分利用卫星剩余资源, 发挥卫星潜能, 从月球到L2再到图塔蒂斯, 实现了具有国际特色和水准的多目标多任务探测, 取得了“好、快、省”的突出实效.

13) 通过对以往研究成果的转化、应用, 开展国

内外多站专项观测, 实现了目标小行星定轨和预报, 精度达到国际先进水平.

嫦娥二号卫星的成功表现, 推进了中国航天技术的发展, 提升了航天器的能力水平. 其中, 卫星轨道测量精度、控制精度、热环境适应性、飞行控制自主性、探测分辨率等性能指标均有提高(如表 2 所示); 直接地月转移、X 频段测控通讯、深空轨道与任务设计、自主控制、更高集成度产品等技术能力显著提升, 为中国实施未来的深空探测任务积累了丰富经验. 在表 2 中, 综合比较了国际上近年发射的月球探测器, 不难看出, 嫦娥二号已经跻身当今绕月探测器国际先进水平之列.

### 6.2 科学数据与成果

嫦娥二号携带了 CCD 立体相机、伽玛谱仪、太阳风离子探测器、高能粒子探测器等 7 种科学载荷,

已获取了高分辨率全月球影像、虹湾地区局部影像以及地月空间等约 6 TB 原始数据, 按照探月工程科学数据发布政策, 已分级发布给包括港澳在内的全国相关高校和科研院所, 将带动我国月球和空间科学的深化研究科学数据的分析研究. 目前已取得了空间分辨率 7 m 的全月球图像(图 5)、多种元素月面分布图(图 6 和 7)等多项重要科学成果. 科学数据的分析研究是个长期的过程, 经过一段时间的研究, 基于嫦娥二号获取的数据, 科学家们将会进一步深化对月球科学及空间科学的认识和理解, 为解答月球和太阳系起源等科学问题, 得到更多的创新成果.

### 7 对未来我国深空探测发展的思考

深空探测往往最能体现科技创新实力. 在这一领域一直都是发达国家独领风骚, 少数实力相对雄

表 2 嫦娥二号卫星与近几年月球探测器综合比较

技术指标和 实施效果	日本 月亮女神	美国 月球勘察轨道探测器	中国 嫦娥一号	中国 嫦娥二号
奔月轨道和 到达时间	大椭圆转移轨道 17 d	直接奔月 约 5 d	调相轨道 12 d	直接奔月 5 d
环月轨道	100 km×100 km	100 km×100 km 50 km×50 km	200 km×200 km	100 km×100 km 100 km×15 km
测控通信	S+X 频段	S+Ka 频段	S 频段	S+X 频段
有效载荷	荧光 X 射线谱仪、伽玛 射线谱仪等 15 个载荷	宇宙射线望远镜、红外 滤波辐射仪等 7 个载荷	CCD 立体相机、成像光谱仪、 γ/X 射线谱仪等 8 个载荷	TDI-CCD 立体相机、监视相机、 空间粒子探测谱仪等 12 个载荷
载荷/卫星干重比	14.5%	12%	12%	14.1%
月面成像	局部, 10 m	局部, 0.5 m	全球, 120 m	全球, 7 m 局部, 1.3 m
拓展试验	撞击月球	撞击月球	撞击月球	日-地拉格朗日 L2 点探测 4179 小行星飞越探测

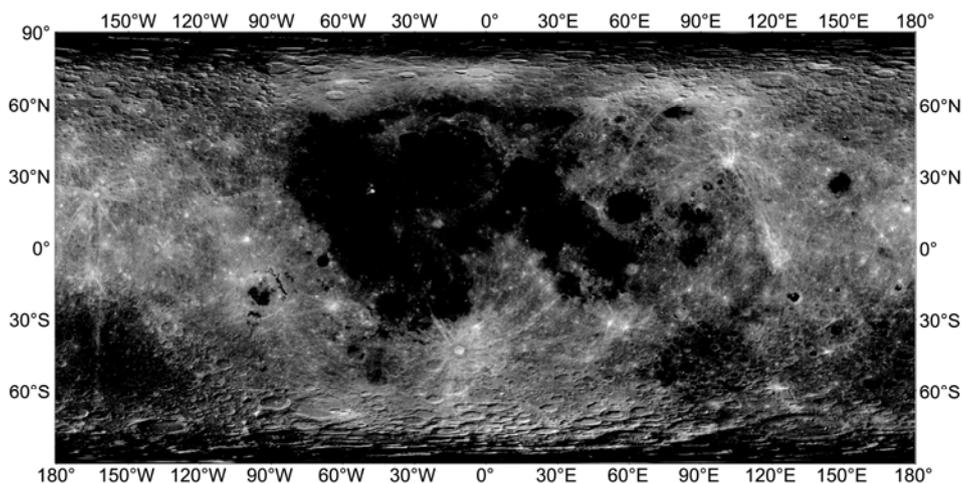


图 5 嫦娥二号卫星获取的全月图

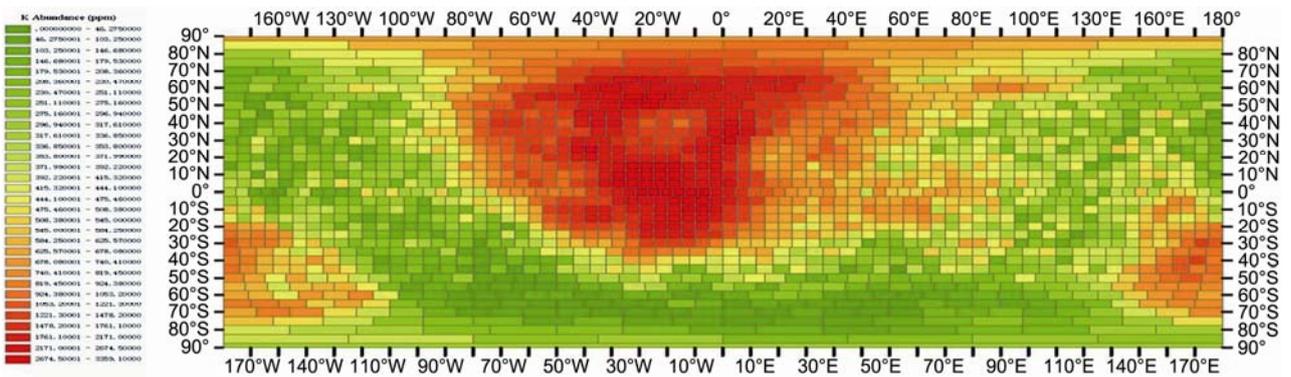


图 6 月球表面钷元素分布图

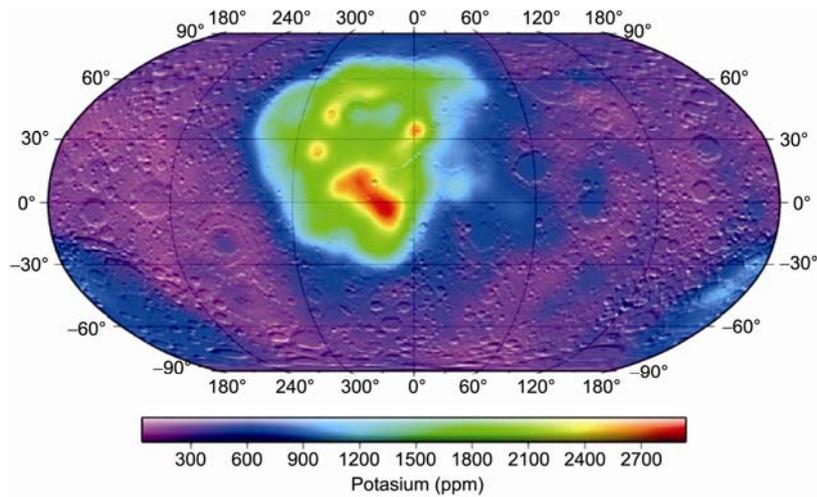


图 7 月球表面钾元素分布图

厚的发展中国家也在跃跃欲试。

美国全面发展并遥遥领先,保持了每年实施 2~3 次任务的推进速度,近期成功实施的好奇号火星实验室、朱诺号木星探测器代表了国际最高水平。欧洲在先后取得了火星快车、金星快车及 SMART 月球探测的成功后,又实施了先进的罗塞塔任务。前苏联解体后,其科技发展受到严重制约,近二十年来俄罗斯的深空探测任务均以失败而告终。在亚洲,日本火星和金星项目均由于制动环节问题而失败,但在探月领域先于中国取得了成功;在小行星采样返回方面,日本也取得领先,虽历经波折,终于成功返回,但采样环节表现不理想,因而计划实施改进的“隼鸟二号”。印度在 2008 年紧随中国之后成功探月(不圆满),并宣称 2013 年将实施其首次火星探测任务。

我国探月工程二、三期在按计划顺利推进,并取

得了阶段性进展,特别是嫦娥一号、二号的成功实施,体现了中国深空探测领域的相关技术取得了整体突破,已经有能力适时开展更远的行星际探测<sup>[3]</sup>。为此,对未来我国深空探测领域的发展,提出如下建议。

1) 探月工程的一系列尝试与突破表明,我国在深空探测领域也有了相当的积淀和技术基础。鉴于国外深空探测的历史和态势,考虑到深空探测在科技创新方面的巨大牵引作用,应该抓住时机,尽快开展行星际深空探测活动<sup>[4]</sup>,加速提升探测能力。

2) 我国是最大的发展中国家,有一定的科技基础及较为完整的体系,并正在积极谋求向创新型国家和航天强国转变,应在深空探测这一属于全人类的领域有所作为,作出应有贡献。

3) 对与航天强国和国际先进宇航公司之间的差

距要有清醒的认识, 尊重科技发展规律, 争取“小步快行”和“有所为有所不为”, 尽快缩小差距, 重点进行选择突破, 并逐渐实现超越。

4) 处理好“充分继承”与“创新发展”的关系<sup>[5]</sup>, 处理好技术突破与科学目标的关系。在突出技术跨越的同时, 强化科学研究目标的确定。我国是大国, 但未必是富国, 国情决定了追求成功的至关重要性。

5) 不同于其他航天领域, 深空探测具有技术和科学相融合的鲜明特征, 也往往是国家科技创新的实力的体现, 不会有本质的市场竞争行为。在发挥中国特色系统工程优势的同时, 应进一步加强多部门、多领域、多学科协作, 发挥互补优势, 强化优势、强强联合, 并在研制体系创新上寻求突破。

6) 确定国际合作策略与战略伙伴定位。在我国未来的深空探测活动中, 需要充分考虑国际合作必要性和效益因素, 在国际合作的程度、原则及战略伙伴等诸多方面作好政策储备。

## 8 结束语

先进的理念、开放的眼界决定效果。经历创新思维、精心设计、全面验证、稳妥实施, 作为我国第 2

颗月球探测器, 嫦娥二号卫星不仅圆满完成了既定的技术验证和科学探测任务, 还以拓展任务方式创造性地跨越实现了首次拉格朗日点和小行星探测, 取得一系列技术突破。嫦娥二号卫星成为我国第一个飞入行星际的探测器, 成为具有国际水准和特色的多目标多任务探测器。中国也成为国际上第 3 个飞入拉格朗日点、第 4 个开展小行星探测的国家。

嫦娥二号卫星的圆满成功, 突破了一批核心和关键技术, 开辟了探测新领域, 开创了任务新模式, 系统性推进了相关领域技术发展, 将中国深空探测事业推进到了一个新的高度。嫦娥二号为探月工程后续任务的顺利实施奠定了基础, 为未来开展行星际探测任务提供了经验和借鉴, 进一步形成和积累了中国特色重大科技工程管理模式和经验, 培养造就了一批年轻的高素质科技和管理人才, 对开展深空探测活动、推进我国航天事业发展、提高民族凝聚力、建设创新型国家具有重大意义。

作为一项重大工程, 嫦娥二号取得的技术成就及其技术突破得益于探月工程的相关各方的科学指导、有力支持, 得益于运载火箭、地面测控、地面应用和发射场系统大力协同, 是研制单位联合高校、研究机构大协作的成果。

## 参考文献

- 1 嫦娥二号卫星工程手册. 探月与航天工程中心. 北京, 2010
- 2 黄江川, 饶炜, 孟林智, 等. 嫦娥二号卫星技术特点分析. 航天器工程, 2010, 19: 7-11
- 3 叶培建. 中国深空探测发展展望与思考. 2007 高技术发展报告. 北京: 科学出版社, 2007
- 4 叶培建, 彭兢. 深空探测与我国深空探测展望. 中国工程科学, 2006, 8: 17-18
- 5 叶培建, 张焱, 饶炜. 积极应对深空探测的技术挑战. 航天器工程, 2006, 15: 1-7